核电机组蒸发器水位调节机构适配技术研究及应用

Research and Application of Adaptation Technology for Steam Generator Level Control Actuator in Nuclear Power Units

摘要：核电机组在高负荷工况下，给水泵转速调节系统与主/旁路阀调节系统形成耦合，导致控制系统出现调节震荡情况，对执行机构的可靠性和耐久性带来挑战，同时对核电机组的安全稳定运行带来影响。故如何解决高负荷工况下控制系统耦合震荡问题至关重要。深入分析多基地波动曲线，发现执行机构响应特性慢，不能及时跟随控制系统的响应速度，是造成调节波动的主要原因。通过执行机构响应特性曲线评估，优化阀门执行机构参数，实施比例增益、速度增益、最小回路增益匹配设置，实现小信号跟随性好、大信号超调性低、时间响应特性快三方面的响应特性优化，提升执行机构兼具小信号、大信号时良好的响应和控制特性。从执行机构调节特性的角度提升高负荷下蒸发器水位控制的稳定性。

关键字：蒸发器水位调节；耦合震荡；响应特性；执行机构适配

Abstract: Under high load conditions, the speed regulation system of the feedwater pump and the main/bypass valve regulation system of nuclear power units are coupled, resulting in control system oscillation, which poses a challenge to the reliability and durability of the actuator, and also affects the safe and stable operation of the nuclear power unit. Therefore, it is crucial to solve the coupling oscillation problem of control systems under high load conditions. Through in-depth analysis of the multi base fluctuation curve, it was found that the slow response characteristics of the executing mechanism and the inability to follow the response speed of the control system in a timely manner are the main reasons for the adjustment fluctuation. By evaluating the response characteristic curve of the actuator, optimizing the parameters of the valve actuator, implementing matching settings for proportional gain, speed gain, and minimum loop gain, optimizing the response characteristics in three aspects: good small signal follow-up, low large signal overshoot, and fast time response. And it improve the response and control characteristics of the actuator when it has both small and large signals. By adjusting the characteristics of the actuator, the fluctuation amplitude of the steam generator water level under high load was significantly reduced.

Keywords: Steam generator level control；Regulation coupling；Response characteristics；Actuator adaptation

1. 引言

蒸发器水位控制系统承载核电厂重要工艺控制功能，主要目的是将蒸发器二次侧的水位维持在整定值[1]。若水位过高，将造成出口蒸汽含水量超标，加剧汽轮机的冲蚀现象，影响机组的寿命甚至导致机组损坏。若水位过低，将会导致U型管顶部裸露，可能导致给水管线出现水锤现象，造成蒸发器损坏，对机组的安全造成严重威胁。蒸发器水位控制逻辑复杂、控制变量多；在设计上蒸发器水位正常运行值与保护动作定值的裕度小，同时叠加工艺系统虚假水位[2]作用明显等因素影响，使得蒸发器水位控制系统成为核电机组最为重要、最为敏感的控制系统之一。据统计，国内外因为蒸发器水位控制异常导致的反应堆自动停堆的次数累计超过50次，蒸发器水位控制异常是导致机组瞬态或者反应堆自动停堆最为主要的原因，故蒸发器水位控制的稳定性对于核电机组的安全稳定运行至关重要。多基地核电机组在不同工况下,特别是高负荷工况下，均存在不同程度水位调节波动异常，严重时触发偏差报警，运行不得不手动干预控制蒸发器液位，给机组的安全稳定运行带来潜在威胁。为改善蒸发器水位的控制效果，国内外研究人员做了许多研究。如改进型控制器[3-5]、双PI控制[6]、自抗扰控制[7]、模糊控制[8]、神经网络控制[9]等，这些方法在蒸发器水位的控制上取得了一定的效果，但对于调节震荡的改善作用有效。所以对于蒸发器水位控制系统在高负荷工况下的稳定性提升和改进显得尤为关键和迫切[10]。

2. 原因分析

2.1. 原理介绍

核电机组蒸发器水位控制主要分为主给水调节阀调节系统和给水泵转速调节系统，如图1所示。

主给水调节阀调节系统的控制是通过调节进入该蒸汽发生器的给水流量来完成。每台蒸汽发生器的正常给水回路设置有两条并列的管线：主管线上的主给水调节阀用于高负荷运行工况下的水位调节，旁路管线上的旁路调节阀则是应用于低负荷及启、停阶段的运行工况；其中主给水调节阀以蒸发器出口的蒸汽流量和蒸发器入口的给水流量之差（即汽水偏差信号）作为开环通道前馈信号，以蒸发器的实测水位与整定值之差（即水位偏差信号）经过PID（比例积分微分）控制环节生成闭环通道的控制信号，两个信号再次经过PI（比例积分）控制环节输出主给水调节阀的开度信号[11-12]。旁路调节阀以蒸发器水位定值和水位测量值的偏差调节量与总蒸汽流量前馈信号之和作为旁路调节阀的开度信号[13]，在满功率阶段一直处于全开位置，不参与调节。给水泵转速调节系统根据控制信号调节勺管位油控制转速，维持蒸汽发生器的给水母管和蒸汽母管之间的压差等于一个随负荷变化的整定值，以便维持给水流量控制系统调节阀前

后压差近似恒定，从而消除三台蒸汽发生器之间给水的耦合影响，满足蒸汽发生器的供水流量要求。三台蒸汽发生器的给水母管是共用的，如果只是一台蒸汽发生器的水位[14]偏离整定值而需要改变给水调节阀的开度以改变给水流量时，将会引起给水母管压力的改变。

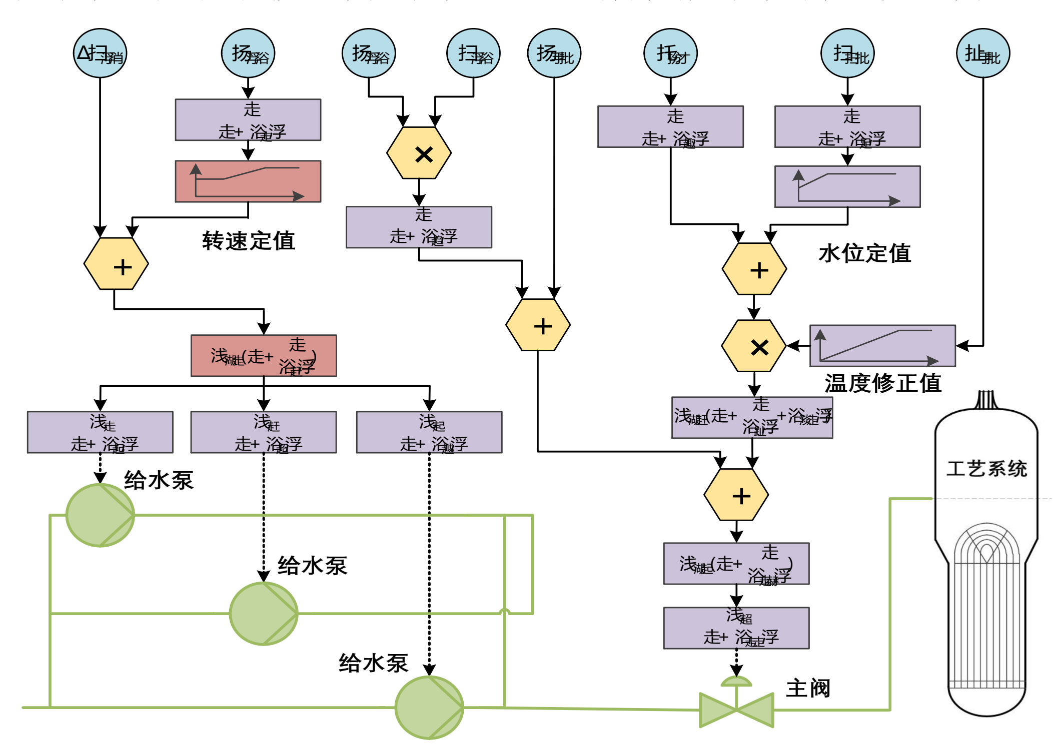


图 1 主给水调节阀调节系统与给水泵转速调节系统

其中，L_{SG}为蒸发器水位，Q_{ST}为蒸汽流量，Q_{FW}为给水流量，P_{ST}为蒸汽压力，T_{FW}为给水温度，P_{PW}为二回路镜像负荷，ΔP_{SW}为汽水压差。

2.2. 调节震荡原因分析

核电机组蒸发器水位控制主给水调节阀常出现周期性波动情况其波动现象如图 2 所示。蒸发器给水流量波动，导致调节给水调节阀开度变化，给水调节阀开度变化导致汽水差压变化，引起给水泵转速调节。给水泵转速调节变化，导致给水流量变化，汽水流量偏差导致给水调节阀门开度变化。给水泵转速调节系统与主/旁路阀调节系统形成耦合，导致控制系统出现调节震荡情况，对于执行机构的可靠性和耐久性带来挑战，同时对核电机组的安全稳定运行带来影响。

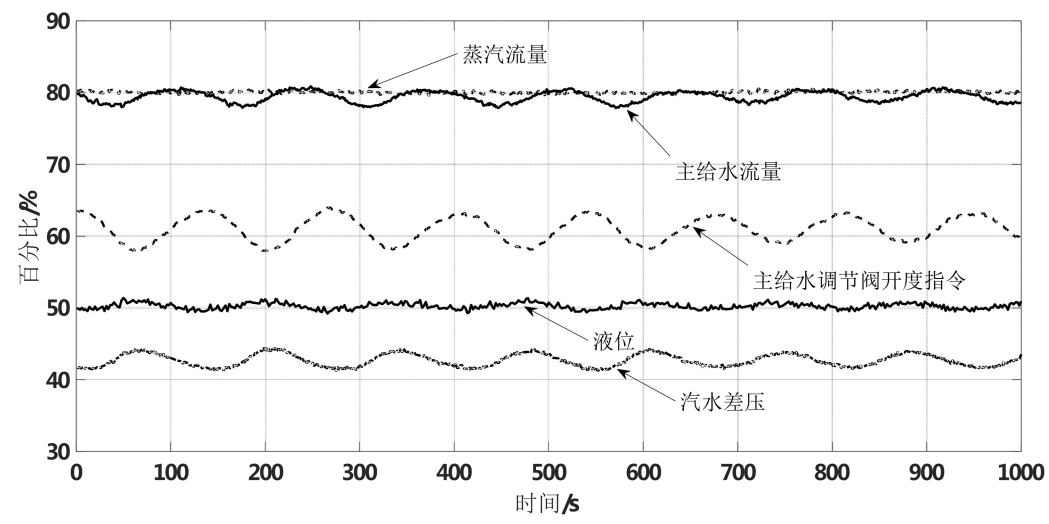


图 2 蒸汽发生器主给水调节阀出现周期性波动

根据多基地核电机组的深入分析，蒸汽发生器主给水调节阀出现周期性波动根本原因为主给水调节阀调节系统与给水泵转速调节系统相互耦合所致，而形成耦合的主要原因为主给水调节阀的调节特性时间与给水泵转速调节特性时间相接近[15]。两个相关性的控制系统产生调节共振现象的两个直接因素：控制系统频率特性 w 和相位差Δφ。若两个控制系统的频率特性相同或者近似，则会产生等幅振荡，这是产生调节共振现象的基础。而等幅振荡幅值的大小与相位差存在直接的相关性。调节系统的频率特性计算时不仅包括调节器的时间特性，还包括执行机构的响应时间。

所以解决主给水调节阀波动的主要措施是破除主给水调节阀调节系统与给水泵转速调节系统相互耦合。通过执行机构响应特性曲线评估，优化蒸发器水位执行机构调节特性，实现从执行机构调节特性的角度提升高负荷下蒸发器水位控制的稳定性。

3. 基于调节机构响应特性的适配技术研究

为消除主给水调节阀波动异常，对基于调节机构响应特性的适配技术进行研究。蒸发器水位控制执行机构采用启动调节阀[16-18]，研究方案主要从小信号跟随性设定、大信号超调性设定以及全行程时间响应特性设定三个方面进行展开，如图 3 所示。主要目的是实现主给水调节阀小信号跟随性好、大信号超调性低、时间响应特性快三方面的响应特性优化，提升调节机构兼具小信号、大信号时良好的响应和控制特性。

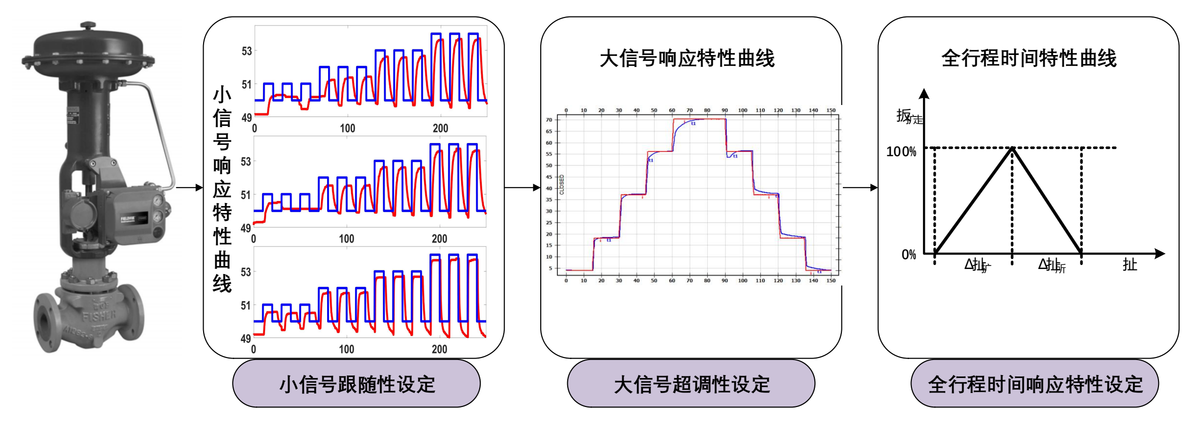


图 3 基于调节机构响应特性的适配技术

3.1. 小信号跟随性设定

小信号跟随性设定为对主给水调节阀指令信号实施小幅变化，观察主给水调节阀在小信号的变化下实际响应情况。具体如图 4~6 所示（不同的参数设置情况下），分别给定 1%、2%、3%、4%的小信号阶跃变化下的调节机构响应曲线。小信号跟随性设定主要满足两个指标，一是主给水调节阀在小信号的变化下实际开度变化；二是主给水调节阀在小信号的变化下开度变化速度：

$$\Delta V_{O1} \geq \lambda_1 C$$

$$\Delta T_s \leq T_a$$

其中，ΔV_{O1}为主给水调节阀指令信号下实际开度变化，C 为主给水调节阀指令信号，λ_1跟随性系数，ΔT_s 为主给水调节阀指令信号下实际开度变化指令信号的 63.2%所需的时间，T_a 为小信号时间响应标准值。

小信号跟随性设定主要满足上述指标要求。如不能满足上述指标，通过比例增益、速度增益、最小回路增益匹配设置，使其满足要求值。

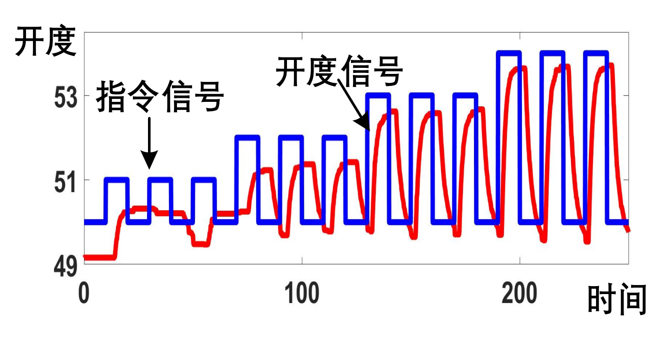


图 4 小信号跟随性设定（参数 1）

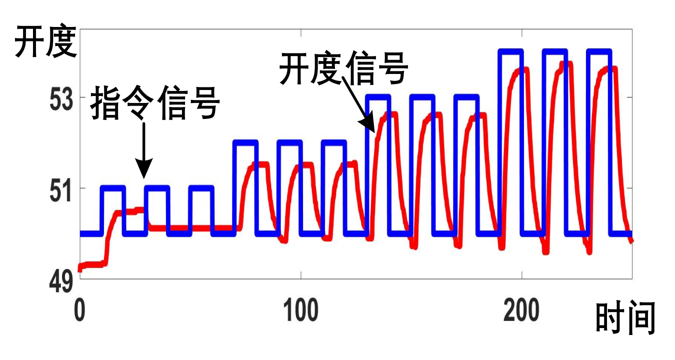


图 5 小信号跟随性设定（参数 2）

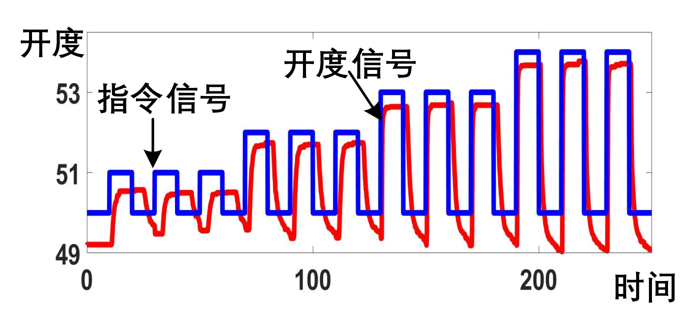


图 6 小信号跟随性设定（参数 3）

3.2. 大信号超调性设定

大信号超调性设定为对主给水调节阀指令信号实施 25%阶跃变化，观察主给水调节阀在大信号的变化下实际响应情况。具体如图 7~9 所示（不同的参数设置情况下），分别给定 0%、25%、50%、75%、100%的大信号阶跃变化下的调节机构响应曲线。大信号超调性设定主要满足两个指标，一是主给水调节阀在大信号的变化下的超调量小于超调率标准值；二是主给水调节阀在大信号的变化下开度变化速度：

$$\Delta V_c \le \lambda_2$$

$$\Delta T_s \le T_b$$

其中，ΔV_c 为主给水调节阀指令信号下的超调量，λ_2超调率标准值，ΔT_s 为主给水调节阀指令信号下实际开度变化指令信号的 63.2%所需的时间，T_b 为大信号时间响应标准值。

小信号跟随性设定主要满足上述指标要求。如不能满足上述指标，通过比例增益、速度增益、最小回路增益匹配设置，使其满足要求值。

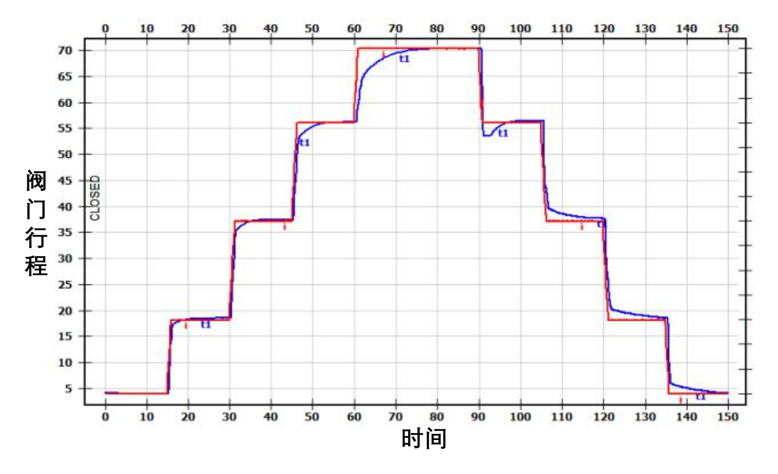


图 7 大信号超调性设定（参数 1）

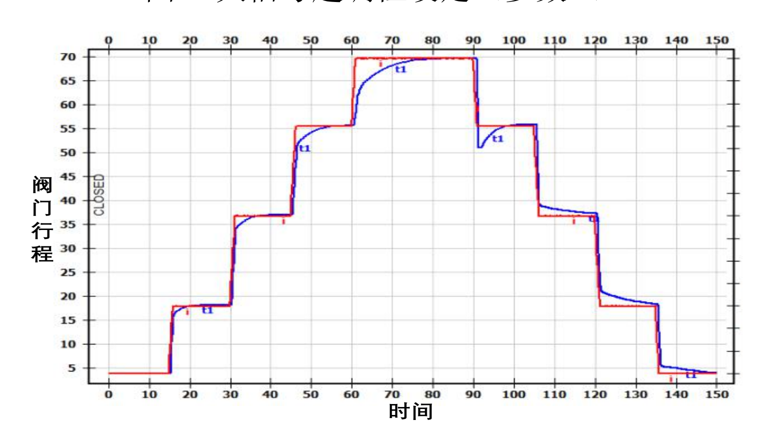


图 8 大信号超调性设定（参数 2）

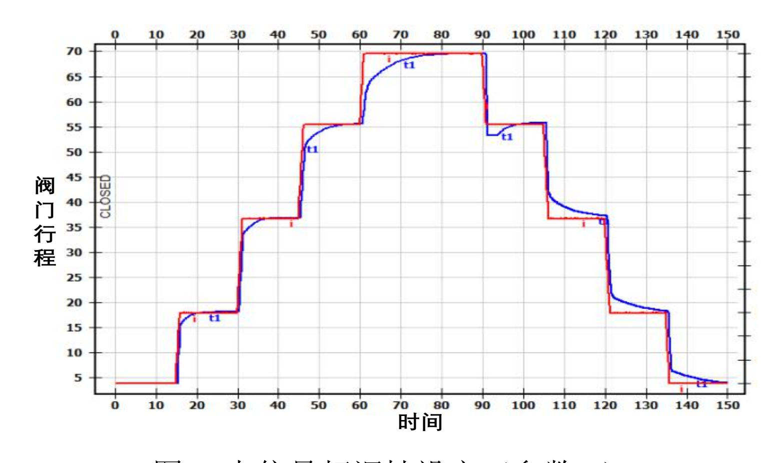


图 9 大信号超调性设定（参数 3）

3.3. 全行程时间响应特性设定

全行程时间响应特性设定是确认主给水调节阀全行程开关时间满足工艺系统的要求，如图 10 所示，目的是加快执行机构全行程的响应速度，即主给水调节阀指令信号分别为全开和全关，验证主给水调节阀实际全开和全关所使用的时间，需要满足以下要求：

$$\Delta T_{O} \leq T_{c1}$$

$$\Delta T_{C} \leq T_{c2}$$

其中，T_{c1}为全行程时间开标准值，T_{c2}为全行程时间关标准值。

若全行程时间响应特性设定不能不满足要求，通过执行机构特性参数优化、供气压力范围调整、流量放大器调节三个方面进行设置，以实现全行程时间响应特性设定满足标准值要求。

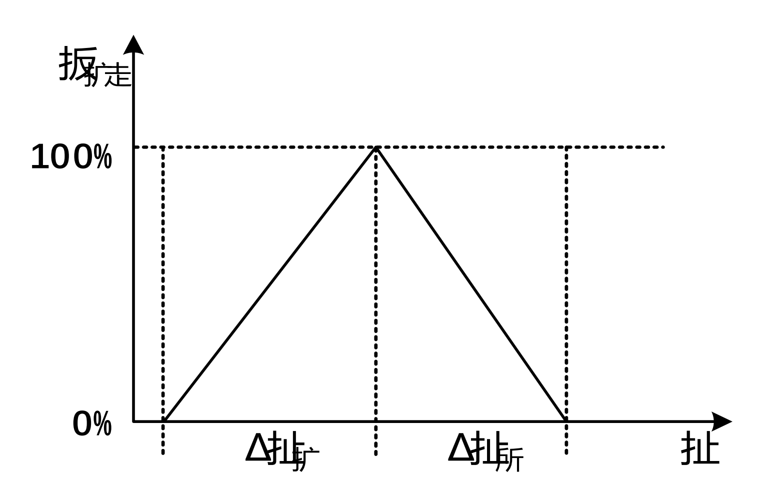


图 10 全行程时间响应特性设定

4. 工程应用及验证

基于调节机构响应特性的适配技术通过小信号跟随性设定、大信号超调性设定以及全行程时间响应特性设定，使其满足实现小信号跟随性好、大信号超调性低、时间响应特性快三方面的响应特性优化，提升执行机构兼具小信号、大信号时良好的响应和控制特性。

基于调节机构响应特性的适配技术已在国内多基地核电机组得到应用实施，以国内某核电基地为例，改进前后蒸发器水位控制在高负荷情况下水位响应曲线对比如图 11 所示。改进前主阀调节波动在 5~8%，改进后主阀调节波动在 1~3%，调节波动得到大幅改善，波动幅度降低至原来波动幅值的 10~40%，显著提升了蒸发器水位控制的稳定性。

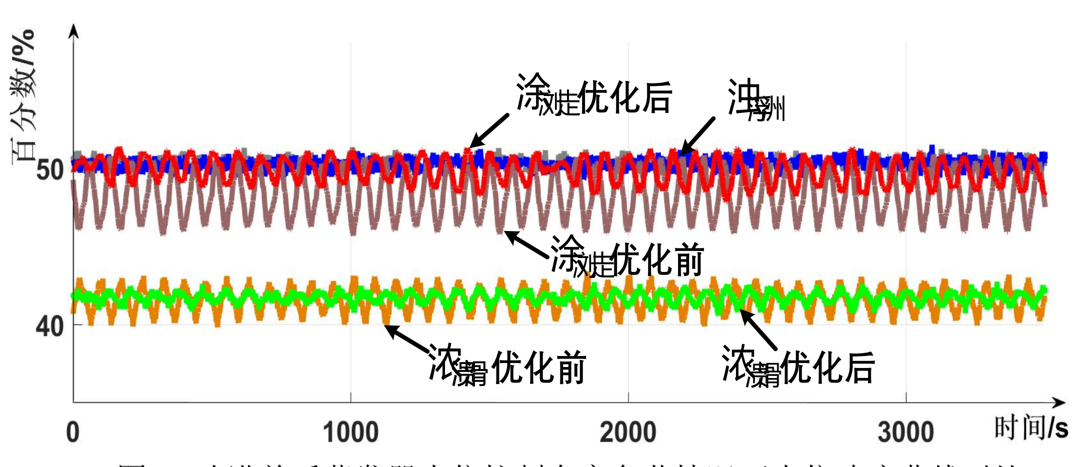


图 11 改进前后蒸发器水位控制在高负荷情况下水位响应曲线对比

其中，P_{SW}为给水压力，V_{O1}为主给水调节阀开度，L_{SG}为蒸发器水位。

5. 结论

针对核电机组在高负荷工况下，给水泵转速调节系统与主/旁路阀调节系统形成耦合，导致蒸发器水位控制系统出现调节震荡情况。定位形成耦合的主要原因为主给水调节阀的调节特性时间与给水泵转速调节特性时间相接近。为此提出基于调节机构响应特性的适配技术，通过小信号跟随性设定、大信号超调性设定以及全行程时间响应特性设定，提升了调节机构兼具小信号、大信号时良好的响应和控制特性。该技术在国内多基地核电机组得到实施和应用，大幅改善波动幅度，保障核电机组的安全稳定运行。

参考文献

[1]朱建敏,胡友森,张薇等.蒸汽发生器水位不确定性分析研究[J].核科学与工程，2020，42（03）：353-358.

[2]王娜,朱建敏,胡友森等.蒸汽发生器虚假水位现象及水位控制研究[J].核科学与工程,2022,42(05):1077-1084.

[3]郭丹,夏虹.蒸汽发生器水位改进分数阶控制器研究[J].原子能科学技术，2018，52(07)：1268-1275.

[4]陈智,张英,张帆等.岭澳核电站蒸汽发生器水位控制系统改进方案仿真研究[J].核动力工程,2010,31(04):66-70.

[5]米克嵩,谷俊杰,徐培培.内模控制方法在核电厂蒸汽发生器水位系统的应用[J].核动力工程,2010,31(06):29-32.

[6]李凤宇,陆古兵,张龙飞等.蒸汽发生器水位双 PI 控制的改进研究[J].原子能科学技术，2010,44(S1):279-282.

[7]汪明媚,程启明,王映斐等.基于自适应 GA 自抗扰控制在蒸汽发生器水位控制中的应用研究[J].核动力工程,2011,32(06):28-33.

[8]滕树杰，张乃尧，崔震华. 压水堆蒸汽发生器水位的分层自适应模糊控制[J]. 核 动 力 工程，2003，24（3）：281-284.

[9]周洪煜，汪正海，黄建平，等. 蒸汽发生器水位 SDRNN 优化自抗扰控制[J]. 动力工程学 报，2013，33(10)：789-794.

[10]王浩,余嘉炜,周世梁等.基于 BDMP 的核电厂蒸汽发生器水位控制系统可靠性评价[J].原子能科学技术,2017,51(12):2330-2337.

[11]张汲宇,夏虹,彭彬森等.基于深度强化学习的蒸汽发生器水位控制[J].哈尔滨工程大学学报,2021,42(12):1754-1761.

[12]钱虹,叶建华,钱非等.蒸汽发生器水位全程控制系统数字化及仿真实现[J].核动力工程,2010,31(02):58-62.

[13]陈永伟，付敬强，邱河文等，核电站蒸发器水位控制主旁路阀切换改进与优化，原子能科学技术（EI 期刊），2015 年第 49 卷第 3 期：523-528。

[14]YongweiChen,YongjingXie,RenhuZhou,et al.Construction and application of a multivariable comparison model for steam generator level transmitters, Nuclear Engineering and Design,2019（344）:153-158.

[15]YongweiChen,YongjingXie,DailunYou,et al.The“regulation resonance”phenomenon in control systems and optimization schemes, ISA Transactions,2020（97）： 251-260.

[16]赵洪铺,刘际,刘永良等.气动执行器气动控制时间影响因子的理论分析[J].液压与气动,2018(03):89-95.

[17]曲世琳,伍悦滨,赵洪宾.阀门在给水管网系统中流量调节特性的研究[J].流体机械，2003(11)：16-18+32.

[18]杨纪伟.调节阀流量调节理论研究[J].流体机械,2003(02):24-26.